

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA  
OSTRAVA

FAKULTA MATERIÁLOVĚ-TECHNOLOGICKÁ  
KATEDRA METALURGIE A SLÉVÁRENSTVÍ

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Možnosti optimalizace technologie tlakového lití

The Possibilities of Optimization of High-Pressure Die Casting  
Technology

Autor:	Daniel Nepustil
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.
Konzultant:	Bc. Václav Dvorský

Akademický rok 2020/2021

## Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je možnost zefektivnění výroby vysokotlakých odlitků. Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. V teoretické části je blíže vysvětlena problematika tlakového lití a v experimentální části se práce zabývá možnostmi optimalizace této technologie, a to především z pohledu zkrácení doby lití kovu do vstřelovací komory.

## Klíčová slova

Vysokotlaké lití (HPDC), slitiny hliníku

## Abstrakt

The subject of the bachelor's thesis is the possibility of streamlining the production of high-pressure castings. The work is divided into two parts, theoretical and experimental. The theoretical part explains in more detail the issue of die casting and in the experimental part the work deals with the possibilities of optimizing this technology, especially in terms of shortening the time of metal casting into the injection chamber.

## Keywords

High-Pressure Die Casting Technology (HPDC), aluminum alloy

## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Lichému, Ph.D. a konzultantovi z firmy ALW INDUSTRY s.r.o., panu Bc. Václavovi Dvorskému, za jejich vstřícnost a odbornou pomoc a za veškerý čas, který mi věnovali, při vypracování této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat firmě ALW INDUSTRY s.r.o. za možnost tvorby práce s reálnými hodnotami ve výrobě

# Obsah

Úvod.....	6
1 Teoretická část.....	7
1.1 Hliník.....	7
1.2 Značení hliníku.....	7
1.3 Dělení slitin hliníku.....	9
1.3.1 Siluminy .....	9
1.3.1.1 Siluminy podeutektické.....	10
1.3.1.2 Siluminy eutektické.....	10
1.3.1.3 Siluminy nadeutektické.....	10
1.3.2 Duraluminy.....	11
1.3.3 Hydronalia.....	11
1.4 Technologie tlakového lití.....	11
1.5 Dělení technologie vysokotlakého lití.....	12
1.5.1 Vysokotlaké lití se studenou lící komorou .....	12
1.5.2 Vysokotlaké lití s teplou lící komorou .....	13
1.5.3 Squeeze casting .....	14
1.5.4 SSM Processing.....	15
1.6 Pracovní cyklus u tlakového lití .....	17
1.7 Popis plnění dutiny formy taveninou .....	18
1.8 Volba parametrů stroje pro HPDC .....	19
1.9 Forma pro HPDC .....	19
1.9.1 Popis formy .....	20
1.9.2 Materiál forem.....	21
1.9.3 Simulace .....	21
1.10 Neshody odlitku .....	23
1.10.1 Povrchové vady .....	23
1.10.1.1 Drsnost povrchu .....	23

1.10.1.2	Mapovitý povrch .....	24
1.10.1.3	Zatekliny.....	24
1.10.1.4	Nárosty .....	25
1.10.2	Vnitřní vady.....	25
1.10.2.1	Bubliny .....	25
1.10.2.2	Staženiny .....	26
1.10.3	Porušení souvislosti odlitku .....	26
1.10.3.1	Trhliny.....	26
1.10.3.2	Praskliny.....	27
1.10.3.3	Studené spoje.....	27
2	Praktická část .....	28
2.1	Aktuální výroba.....	28
2.2	Průběh měření .....	28
2.3	Naběračky a jejich vliv.....	28
2.4	Výsledky měření .....	30
3	Závěr .....	33
	Použitá literatura .....	34
	Seznam obrázků .....	36
	Seznam tabulek .....	37

## Úvod

Slévárenství, jakožto metoda, která nám umožňuje odlít jak jednoduché, tak velice komplikované tvary, je technologie lidstvu známá již více než 5000 let. Její počátky se udávají až do staré Persie, Číny a později i do Egypta. Hlavní výrobní náplň tehdejší doby tvořily hlavně šperky a zbraně, později ozdobné sošky a sochy. Odlévala se převážně slitina mědi. V 18. a 19. století se slévárenství, za pomoci průmyslové revoluce, rozvíjí a začíná se používat ocel a litina pro průmyslové účely. Druhá polovina 20. století se řadí mezi nejvýznamnější milník slévárenství, byla vyvinuta technologie tlakového lití a s ní začal nástup hliníkových slitin. Tato technologie nám zajistila svět, jaký známe nyní, ať se jedná o automobilový, letecký nebo chemický průmysl.

V dnešní době se čím dál častěji používá vysokotlaké lití. Hlavní výhodou této technologie je rychlost výroby. Dalším důležitým aspektem je dobrá povrchová jakost a rozměrová přesnost. Díky tomu se snižuje cena a zvyšuje efektivita použitého kovu. I když jsou počáteční náklady na výrobu vysoké, celkový výdělek zajistí návratnost těchto nákladů.

Cílem bakalářské práce je tedy optimalizace vysokotlakého lití hlavně z pohledu doby nalití kovu z naběračky do vstřelovací komory. Jako výsledek experimentu v praktické části bude analýza dat získaných z reálné výroby a následné návrhy optimalizace pro tuto technologii.

V bakalářské práci se zaměřuji, pokud není jinak napsáno, hlavně na vysokotlaké lití se studenou horizontální komorou s podporou vakua.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Hliník

S hliníkem se v každodenním životě setkáváme čím dál častěji, jeho velkou využitelnost můžeme spatřit při stavbách výškových budov, při výrobě okenních rámců, v odvětvích jako elektronika, letectví, kosmonautika, v automobilovém průmyslu, v chemickém, potravinářském, prakticky kdekoli, kde si vzpomeneme. U takto rozšířeného materiálu (a jeho slitin) je použití klasického gravitačního lití do pískových forem neefektivní při vysokém počtu odlitků, ale je to ideální příklad pro masovou výrobu. Nejúčinnější možnost pro masovou výrobu ve slévárnách je použití kovových forem. Díky této metodě je možno vyrobit až statisíce odlitků za pomoci jedné formy, když se k tomu přidá ještě technologie lití pod tlakem, tak se dosahuje vysoké produktivity. [1]

Hliník je druhý nejvýznamnější prvek pro průmysl hned po železe. Za normálních podmínek je stálý, ale se zvyšující teplotou se stává reaktivnější za vzniku oxidů. Vyrábí se především z bauxitové rudy ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Pro průmyslové aplikace je čistý hliník (čistota 99,5 %) nevhodný pro jeho slabé mechanické vlastnosti. Proto se často spojuje s dalšími prvky za vzniku slitin. Máme k dispozici 3 základní slitiny hliníku, jedná se o siluminy (slitina s křemíkem), duraluminy (slitina s mědí) a hydronalia (slitina s hořčíkem). Hliník je také možno modifikovat, například titanem nebo zirkonem, které fungují jako krystalizační zárodky. Struktura takto modifikovaného kovu je jemnější. V závislosti na zvyšující se jemnosti struktury rostou i mechanické vlastnosti materiálu jako je například pevnost v tahu. Hliník, tedy především jeho slitiny, jsou díky svým specifickým vlastnostem značně používány v mnoha odvětvích, jak už bylo řečeno výše. Jeho nejzajímavější vlastnost, která v dnešní době začíná růst na vážnosti je recyklace. Hliník je považován za nekonečně recyklovatelný materiál. [1; 2; 3]

## 1.2 Značení hliníku

Hliník a jeho slitiny se v dnešní době značí podle evropské normy ČSN EN 1706 (421433), která byla naposledy aktualizována a schválena v listopadu roku 2020. Jedná se o normu pro slitiny hliníku na odlitky. [4]

Formát této normy je následující: EN AC-XXXXX

Kde: EN představuje zkratku evropská norma

Písmeno A představuje hlavní prvek – aluminium neboli hliník

Písmeno C představuje typ použití – casting neboli odlévání

Poslední pětičíslí určuje typ složení [5]

Jako příklad bude popsáno chemické složení slitin hliníku EN AC-44300, EN AC-47100 a EN AC-46000, se kterými jsem se setkal ve slévárně při měření experimentu, který bude uveden v praktické části.

Materiál EN AC-44300, chemické značení AlSi12(Fe)

*Tabulka 1 chemické složení AlSi12(Fe) [6]*

chemické složení v hm %											
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
zbytek	10,5-13,5	0,45-0,9	max 0,1	max 0,55	max 0,05	max 0,05	max 0,05	max 0,15	max 0,05	max 0,05	max 0,15

Materiál EN AC-47100, chemické značení AlSi12Cu

*Tabulka 2 chemické složení AlSi12Cu [6]*

chemické složení v hm %											
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
zbytek	10,5-13,5	max 1,3	0,7-1,2	max 0,55	max 0,35	max 0,1	max 0,3	max 0,55	max 0,2	max 0,1	max 0,2

Materiál EN AC-46000, chemické značení AlSi8Cu3(Fe)

*Tabulka 3 chemické složení AlSi9Cu3(Fe) [6]*

chemické složení v hm %											
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
zbytek	8-11	max 1,3	2-4	max 0,55	0,05-0,55	max 0,15	max 0,55	max 1,2	max 0,35	max 0,15	max 0,25



### 1.3 Dělení slitin hliníku

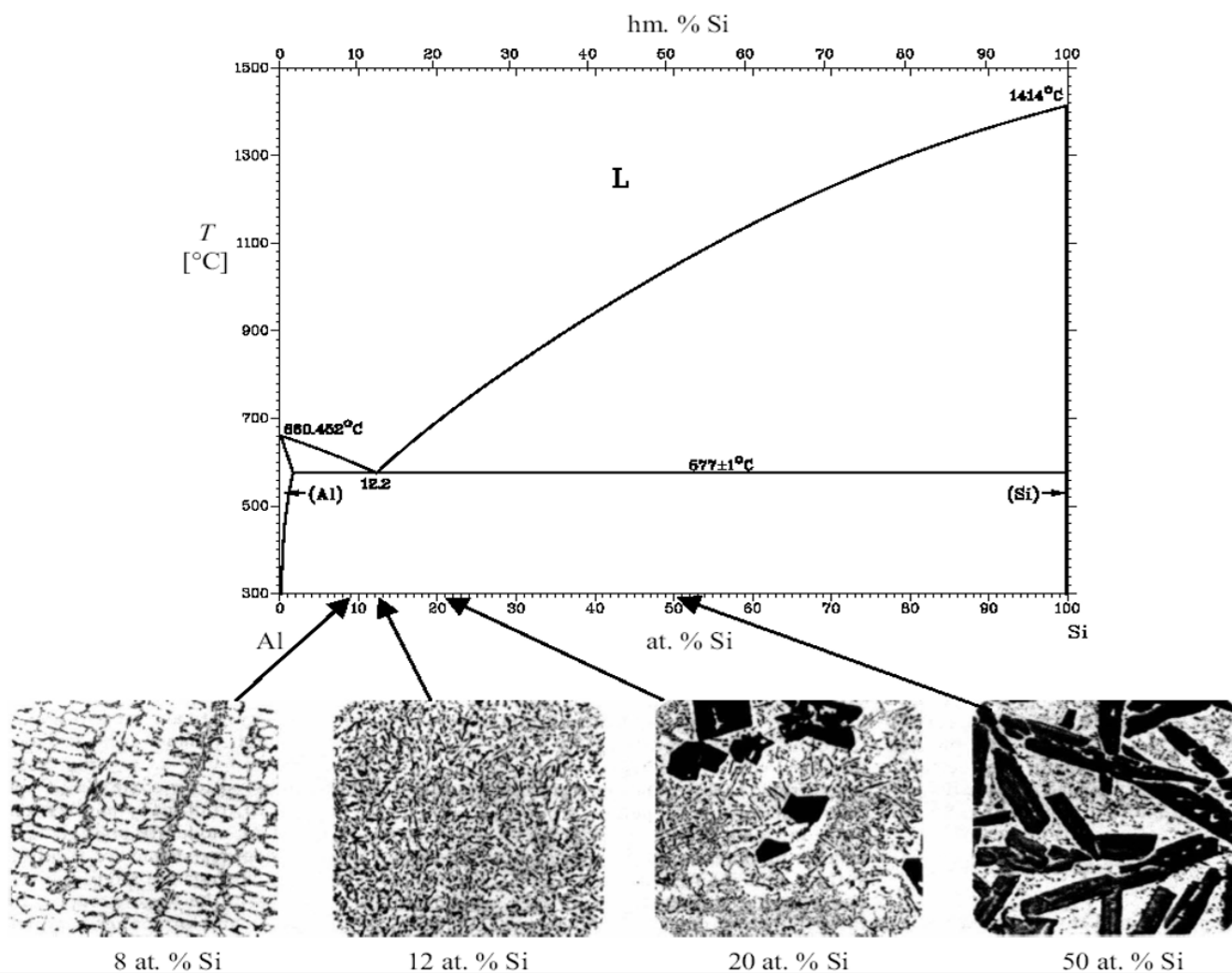
Hliník, jakožto čistý kov se ve výrobě nepoužívá, jak již bylo popsáno výše. Zato jeho slitiny jsou hodně rozšířené. Dělí se tedy na tři základní skupiny, jež jsou popsány níže.

#### 1.3.1 Siluminy

Jedná se o slitinu hliníku s křemíkem. Jejich binární diagram je uveden na obrázku č. 1.

Siluminy se dále dělí na:

- Podeutektické - obsah Si 5-11 %
- Eutektické - obsah Si 11,5-13 %
- Nadeutektické - obsah Si 14-25 % [5]



Obrázek 1 Binární diagram Al-Si [5]

#### 1.3.1.1 *Siluminy podeutektické*

Jedná se o nejpočetnější skupinu siluminů. Struktura podeutektických siluminů je tvořena primárními dendrity fáze  $\alpha(\text{Al})$  a eutektikem vyloučeným v mezidendritických prostorech. S rostoucím obsahem Si roste i obsah eutektika. Podeutektické siluminy mají výbornou kombinaci kladných vlastností jako je například dobrá slévateľnost, nízká tepelná roztažnost, dobrá odolnost proti korozi a obrobiteľnost. Mají však sklon ke tvorbě trhlin za tepla. [5; 7; 8] Podeutektické siluminy mají široké uplatnění v automobilovém průmyslu, a to hlavně pro součásti jako je blok motoru, klikové skříně, sací potrubí a rámy kol. Jedná se o siluminy, které jsou ekonomicky atraktivní pro firmy a lze je tepelně zpracovat. [8]

#### 1.3.1.2 *Siluminy eutektické*

Eutektické siluminy mají nejlepší slévářské vlastnosti, například úzký interval tuhnutí, vysokou zabíhavost, sklon k soustředěným staženinám. Jejich struktura je tvořena pouze eutektikem. Pokud je slitina modifikovaná vyskytují se i jednotlivé fáze  $\alpha(\text{Al})$ . [5; 7]

Použití eutektických siluminů je univerzální, přesto se od nich ustupuje z ekonomického hlediska, protože křemík, jakožto přísadový prvek, je velice drahý.

#### 1.3.1.3 *Siluminy nadeutektické*

Nejsou zakotveny v normách. Jedná se o slitinu se speciálními aplikacemi hlavně v kluzných aplikacích. Struktura obsahuje částice primárního křemíku a eutektikum. [5; 7]

Použitím v kluzných aplikacích můžeme rozumět na rozhraní kov-kov, kdy siluminy nadeutektické mají lepší ořezuvzdornost než zbytek siluminů. Ta je dána vylučujícím se křemíkem ve struktuře slitiny. Nejrozšířenější aplikací těchto siluminů jsou například písty ve spalovacích motorech u luxusnějších aut.

Na obrázku č.1 můžeme vidět struktury jednotlivých siluminů. Obrázky jsou seřazené v následujícím pořadí, zleva doprava; podeutektické, eutektické a nadeutektické. Poslední uvedený obrázek je slitina hliníku s křemíkem, kde křemík dosahuje 51 hm. %.

Jedná se o extrém a v praktických aplikacích se nepoužívá.

V této bakalářské práci budu pracovat především s eutektickými siluminy, které jsou z pohledu slévárství nejpoužívanější. V případě společnosti ALW INDUSTRY s.r.o., ve které jsem měření prováděl se používají materiály EN AC-44300, EN AC-47100 a EN AC-46000.

### 1.3.2 Duraluminy

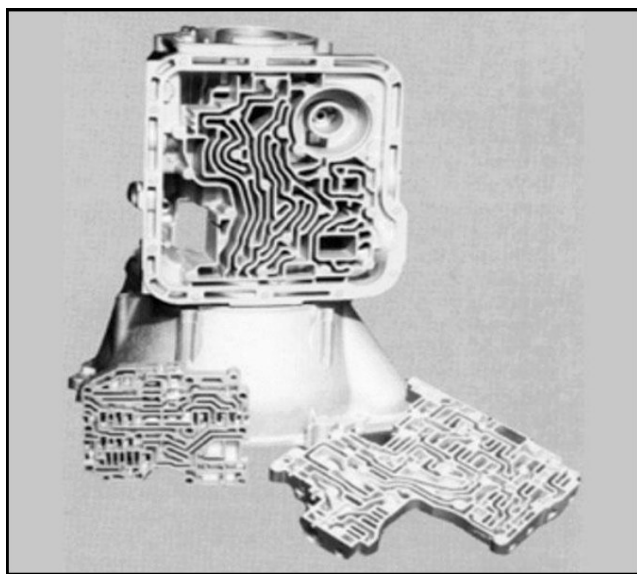
Jedná se o slitinu hliníku s mědí, kde obsah mědi je 3-8 %. Tato slitina se z velké části používá pro tvářené polotovary. Duraluminy jsou žáruvzdornější než siluminy, ale mají větší sklon k trhlinám. Žáruvzdornost je zapříčiněna vznikem fáze  $\text{CuAl}_2$  na hranicích zrn. Fáze vzniká v důsledku nerovnovážné krystalizace. [2; 3]

### 1.3.3 Hydronalia

Hydronalia jsou slitiny hliníku s hořčíkem, kde obsah hořčíku je do 10 %. Mají výbornou korozivzdornost, dobrou obrobitelnost a leštitelnost. Jsou uplatňovány hlavně v chemickém a potravinářském průmyslu. Mezi hlavní nevýhody patří špatné slévárenské vlastnosti, široký interval tuhnutí a špatná zabíhavost, dále větší náchylnost k trhlinám. [2; 3]

## 1.4 Technologie tlakového lití

Technologie tlakového lití používá pro výrobu kovové formy. Tyto formy jsou uzpůsobeny pro statisíce cyklů. Na rozdíl od forem jednorázových, které se musí po každém odlití znovu vyrábět, jsou kovové formy velkým přínosem pro masovou výrobu. Lití do těchto forem má výhody zejména v povrchové úpravě odlitku. Jelikož se jedná o přesné lití, není zapotřebí žádných zásadních dokončovacích operací mimo odstřižení vtokové soustavy, metoda přesného lití je charakteristická vysokou rozměrovou přesností. Touto technologií lze vyrábět tvarově složité odlitky, jak lze vidět na obrázku č. 2. I když jsou počáteční náklady tlakového lití vysoké, produktivita této metody zaručuje vysokou návratnost. Nejčastěji jsou právě slitiny hliníku a hořčíku, mohou se ale i použít slitiny cínu, olova, zinku a mědi. [9]



Obrázek 2 příklad odlitku vysokotlakého lití – převodová skříň [10]

### 1.5 Dělení technologie vysokotlakého lití

V technologii tlakového odlévání lze pracovat jak s taveninou, tak materiálem v polotuhém stavu. Dle literatury [11] lze uvést dělení následující:

1. Vysokotlaké lící procesy s taveninou
  - a. HPDC se studenou a teplou komorou (možnost vakua)
    - i. Horizontální
    - ii. Vertikální
  - b. Squeeze casting
2. Vysokotlaké lící procesy s polotuhou taveninou
  - a. SMM Processing (kontrolované chlazení)
    - i. Rheocasting (NRC)
    - ii. Rheomoulding
  - b. SMM Processing (kontrolovaný ohřev)
    - i. Thixocasting (CTC)
    - ii. Thixomoulding

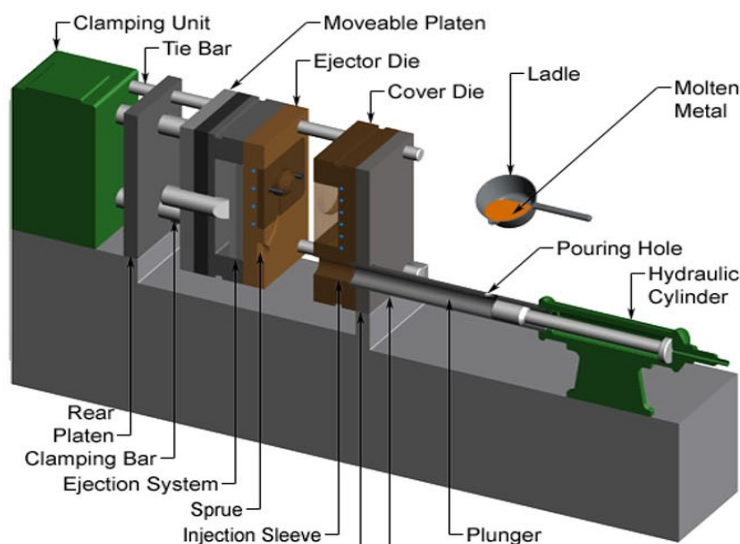
V následujícím textu budou popsány jednotlivé technologie vysokotlakého lití. Hlavní důraz bude kladen na technologii vysokotlakého odlévání se studenou horizontální komorou, neboť tato metoda je používána i v praktické části.

#### 1.5.1 Vysokotlaké lití se studenou lící komorou

Jedná se o nejpoužívanější metodu u technologie tlakového lití. Komora je umístěna mimo formu. Má tvar dutého válce, ve kterém je na určitém místě otvor pro taveninu. Tavenina je umístěna v udržovací peci, která je nastavena na teplotu nad teplotou solidu. U pece je umístěný robotický podavač s naběračkou, pomocí které dopravuje kov nad otvor v komoře a následně ho vlévá do komory. Hydraulický píst je umístěn v dutině komory mezi jejím koncem a otvorem pro taveninu. Po ukončení nálevu dochází ke vstřelu taveniny do formy. [11] Vysokotlaké lití se studenou lící komorou se používá pro odlitky, které mohou dosahovat hmotnosti až 25 kg. Tato skutečnost činí metodu dostupnější z pohledu ekonomického, protože dutina formy může obsahovat více jak jeden odlitek.

Druhou výhodou, která není až tak zásadní, je umístění komory mimo zařízení. Díky tomu není komora tolik teplotně namáhána a lze ji relativně snadno opravit. Tato tepelná dispozice může být regulována za pomoci chladicí soustavy umístěné ve spodní části dutého válce,

tím se zamezí jejímu průhybu způsobenému tepelnou roztažností. Průhyb vznikající tepelnou roztažností materiálu zapříčiní jak odření vnitřní strany komory, tak i poškození pístu. Takto chlazená komora má avšak zásadní nevýhodu spočívající v rychlejším ochlazení taveniny, proto musí mít tavenina vyšší teplotu při odlevu.



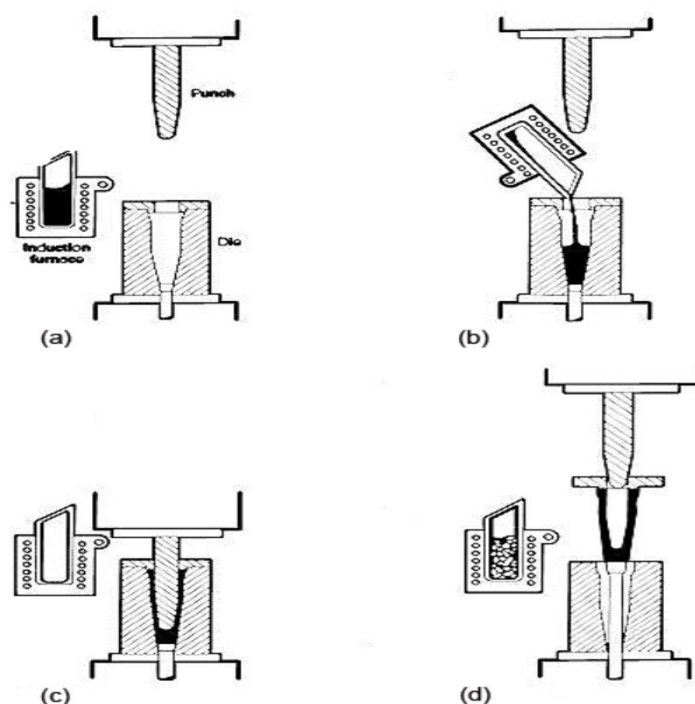
Obrázek 3 schéma HPDC se studenou horizontální lící komorou [12]

### 1.5.2 Vysokotlaké lití s teplou lící komorou

U této konstrukce je komora ponořena do udržovací pece, která drží konstantní teplotu taveniny podle předdefinovaných parametrů. Komora má tvar husího krku, ve kterém je zásobník pro již požadovaný objem taveniny. V zásobníku je umístěn vstup, který zajišťuje přítok taveniny. Když je zásobník naplněn začne píst tlačit na taveninu, která postupuje „husím krkem“ dále do formy. Zásadní nevýhodou těchto komor je koroze materiálu komory. Jelikož je komora umístěna přímo v tavenině, bývá její životnost z hlediska eroze velice omezená. [11]

Protože je komora umístěna v roztaveném kovu je tato technologie často užívaná pro kovy s nižší teplotou solidu, nejpoužívanější jsou proto slitiny hořčíku. Tato metoda je spíše používána u malých odlitků, neboť váha vstřelu je maximálně 2 kg. Oproti HPDC se studenou komorou, kde se tloušťka stěny pohybuje kolem 1,5 – 12 mm, je možné u této metody odlít odlitky s tloušťkou stěny kolem 0,8 – 3 mm. [11]





Obrázek 5 schéma Squeeze casting přímá metoda [13]

#### - Metoda nepřímá

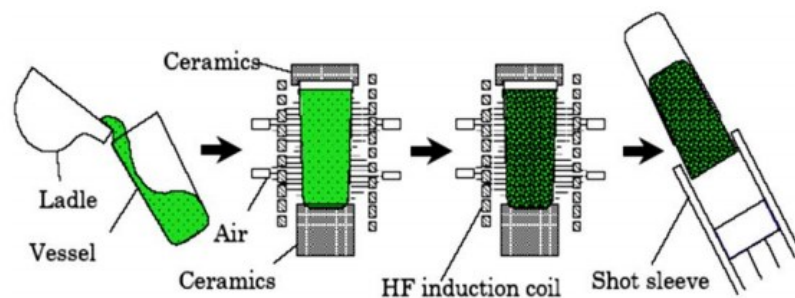
Podobá se HPDC se studenou komorou, ale vstřelovací rychlost je mnohem nižší. To zapříčiní tuhnutí kovu již v komoře. Polotekutý kov se odlévá a přetváří zároveň. [11]

K výhodám této technologie patří lepší mechanické vlastnosti odlitků, nízká pórovitost materiálu a jemnozrnná struktura kovu. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost a delší doba cyklu.

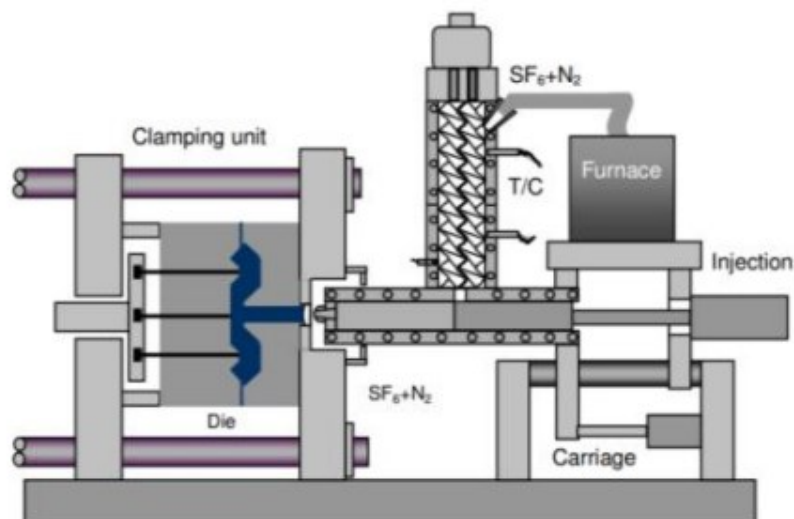
#### 1.5.4 SSM Processing

Semi-solid metal processing je další technologie, která kombinuje výhody odlévání a tváření. Dá se rozdělit na 2 skupiny – podle ohřevu výchozího materiálu, a to na Rheo- a Thixo-.

- Rheo-cesta je metoda přípravy materiálu, která je méně energeticky náročná. Vzniká natavením materiálu, následuje neustálé míchání pomocí indukce, které znemožní vznik dendritické struktury. Výsledkem je kašovitá tekutina s globulární strukturou zrn. [11; 14]

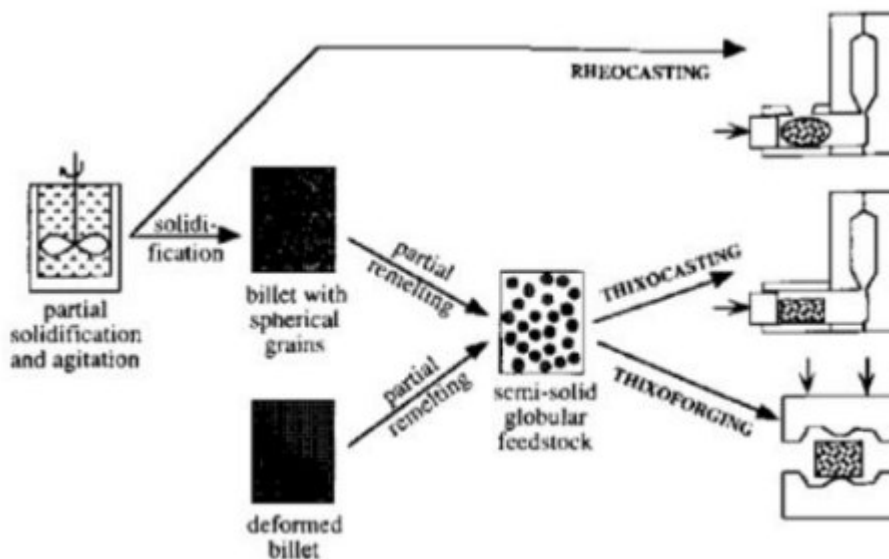


Obrázek 6 schéma fází u technologie Rheocasting [14]



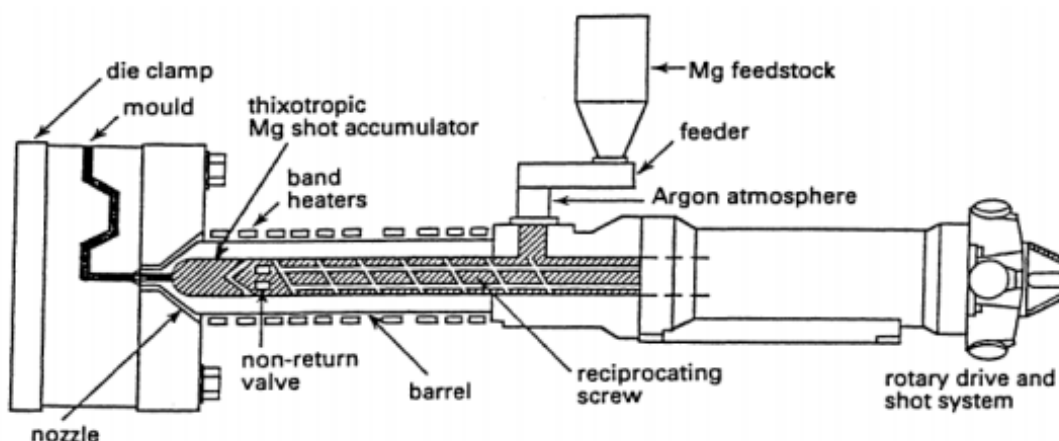
Obrázek 7 schéma dvoušroubového Rheo-moulding stroje [14]

- Thixo-cesta se liší tím, že se natavený materiál nejprve nechá ztuhnout a zchladnout na pokojovou teplotu, následně se znovu ohřeje na teplotu mezi křivkou solidu a likvidu za vzniku nedendritické struktury. Výsledkem je tedy polotuhý polotovár zakládající se z 50 % z tuhé fáze, která má globulární strukturu zrn. [11; 14]



Obrázek 8 schéma různých možností pro Thixocasting [14]





Obrázek 9 schéma procesu Thixomoulding [14]

Takto připravené materiály slouží jako základ pro technologie Rheocasting, Rheomoulding a Thixocasting a Thixomoulding. Výsledné odlitky jsou charakterizovány globulární jemnozrnnou strukturou s vysokým stupněm homogenity, s lepšími mechanickými vlastnostmi a rozměrovou přesností. Principy těchto metod jsou zobrazeny na obrázcích 6-9. [11; 14]

#### 1.6 Pracovní cyklus u tlakového lití

Podstata tlakového lití spočívá ve vstřelování kovu pod vysokým tlakem do formy. Vstřel může mít sílu až 600 MPa a tavenina se pohybuje do formy rychlostí až 80 m/s. [1]

Tato technologie odlévání nám umožňuje například odlévat 6 odlitků na jednom stromečku řádově v sekundách. Čas cyklu je samozřejmě ovlivněn technologií u HPDC se studenou komorou, u squeeze casting se čas cyklu pohybuje okolo 30–120 sekund a u HPDC s teplou komorou je čas cyklu okolo 12–45 sekund. [11; 13]

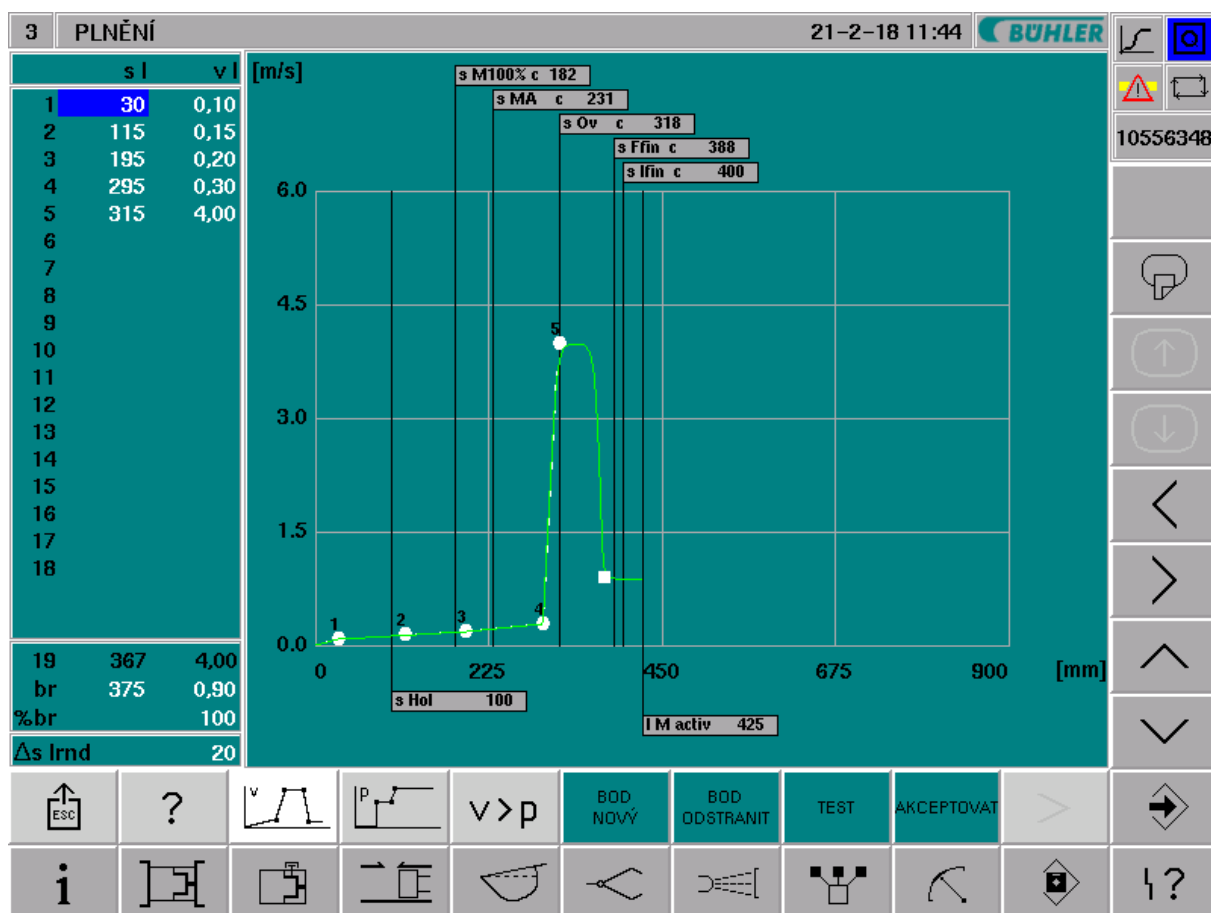
Pracovní cyklus by se dal rozdělit do 7. základních kroků u HPDC se studenou komorou. Některé technologie mají odlišnou dobu cyklu jako je tomu v tabulce č. 4. Tyto je možné plně automatizovat za pomoci CNC robotů s předdefinovaným programem.

Tabulka 4 srovnání pracovních cyklu u HPDC se studenou a teplou komorou [11]

	HPDC se studenou komorou	HPDC s teplou komorou
1	Uzavření formy	Uzavření formy
2	Dávkování taveniny do komory	Tavenina již nachystána – dochází ke vstřelu
3	vstřel	Tuhnutí taveniny
4	Tuhnutí taveniny	Otevření formy
5	Otevření formy	Vyhození odlitu– píst jede do základní polohy otevírá se vtok do zásobníku
6	Vyhození odlitku	Nástřik separátorem
7	Nástřik separátorem	

## 1.7 Popis plnění dutiny formy taveninou

Pro podrobný popis vstřelu taveniny bude sloužit graf ze stroje pro vysokotlaké lití od švýcarského výrobce Bühler. Pohyb pístu započne po odlití veškeré taveniny z naběračky do komory.



Obrázek 10 graf rychlosti pístu v závislosti na pohybu pístu

Na obrázku č. 10 můžeme vidět závislost pohyb pístu na jeho rychlosti. Jak je zřejmé od počátku až po bod č. 4 se píst pohybuje s konstantním zrychlením. Tento pohyb koresponduje s postupným vyplněním komory taveninou. Jelikož 60 % objemu komory tvoří vzduch, tento musí být vyhnán přes dutinu formy ven, a to buď přes výfuky nebo vakuovou pumpu. Od bodu č. 4 je znatelný nárůst rychlosti, ten vzniká v důsledku vstřelu taveniny do formy. Následuje prudké zpomalení a konstantní rychlost. Konstantní rychlost zde představuje dotlak taveniny.

## 1.8 Volba parametrů stroje pro HPDC

Parametrem pro výběr vhodného stroje pro vysokotlaké lití může být například druh odlévané slitiny nebo uzavírací síla stroje, avšak nejdůležitější je velikost odlitku. Čím je odlitek větší, tím je větší jeho plocha, ta záporně působí na sílu uzavírací. Doporučená uzavírací síla se vypočte podle vzorce č. 1.

Pokud v praxi uzavírací síla nesplňuje podmínku podle vzorce č. 2 dochází k prostříku taveniny do dělicí roviny nebo dokonce ven z formy. [15]

$$F_u = \frac{F}{S_L} * S * k_0 \quad (1)$$

$$F_u > \frac{S * p_L}{10^4} \quad (2)$$

$F_u$  ...doporučená uzavírací síla [N]

$F$  ...lisovací síla [N]

$S_L$  ...plocha komory [m<sup>2</sup>]

$S$  ...plocha odlitku [m<sup>2</sup>]

$k_0$  ...koeficient bezpečnosti  $k_0 = 1,1$

$p_L$  ...tlak v MPa viz. tabulka č. 5

Tabulka 5 doporučené hodnoty tlaku u různých slitin [15]

Doporučené hodnoty tlaku			
Druh odlitku	Tlak $p_l$ v MPa		
	Zn	Al, Mg	Cu
odlitky jednoduché	od 10 do 20	do 60	od 30 do 40
odlitky složité	od 20 do 30	od 40 do 80	od 40 do 80
odlitky nepropustné	od 22 do 25		

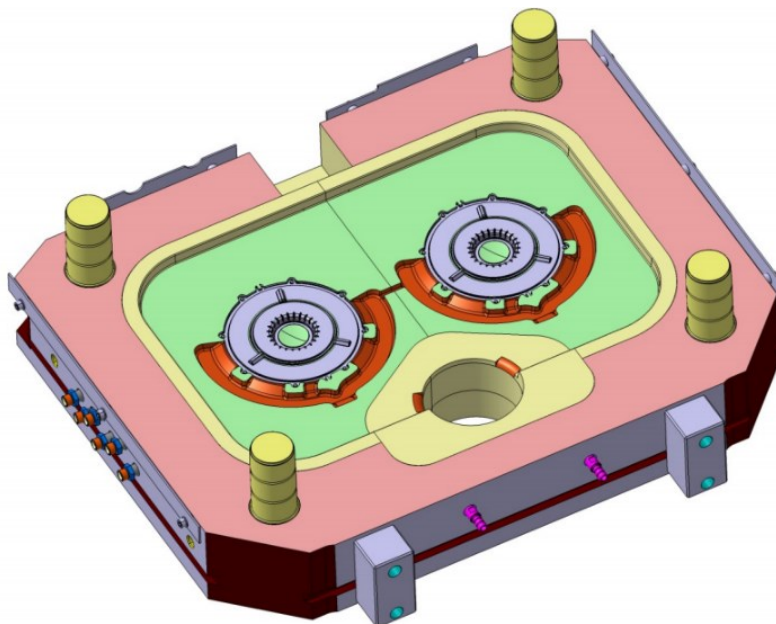
## 1.9 Forma pro HPDC

Forma pro vysokotlaké lití se řadí mezi trvalé formy a nazývá se odborně kokilou. Formy jsou nejdůležitější součástí celé technologie. Jejich cena se pohybuje v řádech milionů korun, proto je jejich vývoj důležitý. Odlitek je tak kvalitní, jak je kvalitní forma, proto jsou vysoké nároky na kvalitu forem. Forma u HPDC je velmi namáhaná, jak teplotně, tak tlakově, proto musí být vyráběna z kvalitní nástrojové oceli nejvyšší jakosti. Forma musí být schopna vydržet řádově 100 000 a více cyklů. Výroba formy je sice nákladná a složitá, ale nejdůležitější je její vývoj. Pokud bude forma špatně navržena mohou vznikat plynové kapsy a tepelné uzly, forma tak bude nežádoucí. Pro správný vývoj formy používáme matematické modelování neboli simulace. [15; 16]

### 1.9.1 Popis formy

Formu tvoří dvě části, část pohyblivá a pevná. Pevná část je nepohyblivě umístěna v rámu stroje, základní charakteristikou této části je otvor pro komoru s taveninou, jak je znázorněno na obrázku č. 11. Dále je nepohyblivá část formy tvořena rámem, který slouží jako nosič tvarové vložky. Právě tvarová vložka je nejdůležitější částí formy, tvoří totiž negativ odlitku. V pohyblivé části se nachází vyhazovače, které slouží pro vyhození odlitku z formy, z tohoto důvodu je větší část odlitku právě v pohyblivé části. Dutina formy je tedy hlavně tvořena negativem odlitku a vtokovou soustavou zahrnující vtokový kůl, rozváděcí kanály, ledvinky (nálitky) a odvodušňovací kanálky.

U vysokotlakého lití s podporou vakua je forma zakončena vlnovcem, který můžeme vidět na obrázku č. 12. Vlnovec je charakterizován a pojmenován podle tvaru, jedná se o tvar vlnky. Tento tvar slouží pro rychlejší ztuhnutí taveniny, aby se zamezilo proniknutí taveniny do vakuové pumpy. Dále se v obou částech formy objevuje temperační neboli chladicí systém, jenž slouží pro chlazení formy, díky kterému má vyšší životnost. Jedná se vlastně o sadu kanálků, které jsou vyvrtané do poloviny formy tak, aby se nepoškodila tvarová vložka. Jsou buď samostatné nebo spojené v jeden chladicí okruh. Hlavní médiem v chladicím okruhu je olej. Pracovní teplota forem u vysokotlakého odlévání je od 180 do 300 °C. [15; 16]



Obrázek 11 3D model pevné části formy u HPDC [16]



*Obrázek 12 vlnovec pro formy podporované vakuem*

### 1.9.2 Materiál forem

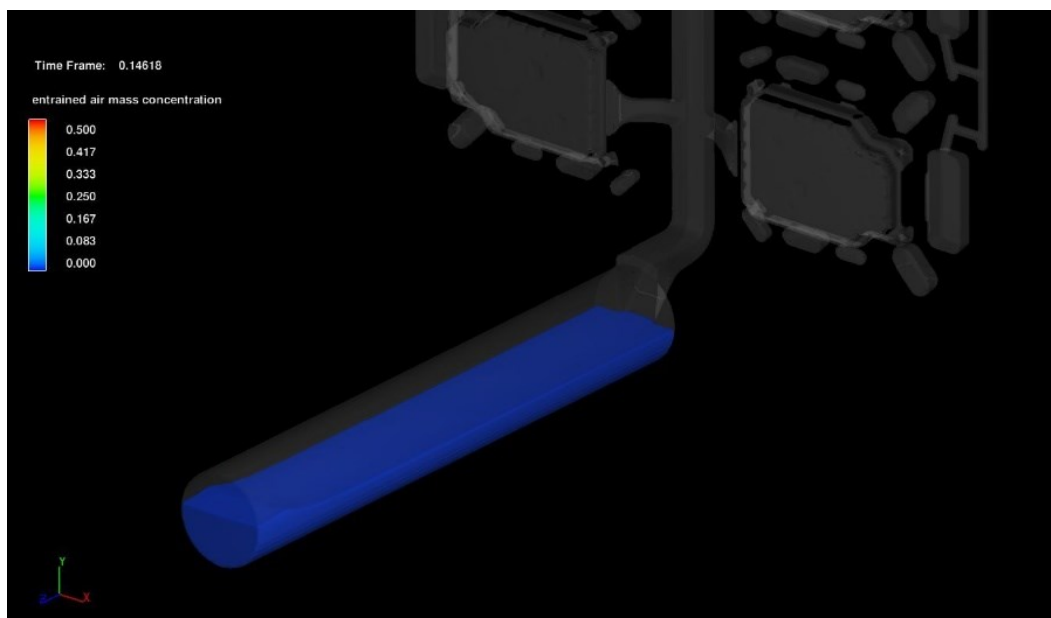
Materiálem tvořící formu je tedy nástrojová ocel. Jedná se o vysokolegované oceli, které mají dobré mechanické vlastnosti, například vysokou mez pevnosti v kluzu. Kvůli tvarové složitosti musí být materiál dobře obrobitelný a prokalitelný. Dalším požadavkem na materiál forem je i práce s teplem, a to konkrétně tepelná vodivost zajišťující dobrý přestup tepla z taveniny do temperačního systému nebo nízká tepelná dilatace pro rozměrovou stálost.

Pro formy pro technologii HPDC se studenou komorou se používá kombinace materiálu pro různé části formy. Pro rám formy se používají konstrukční legované oceli W.Nr. 1.2311, 1.2312 a pro tvarové vložky se používají vysokolegované oceli určené k práci za tepla W.Nr. 1.2343, 1.2344, 1.1730, 1.7131, 1.2379 a 1.2767. U vysokotlakého lití s podporou vakua je vlnovec možné vyrábět z oceli, která je zmiňovaná výše, ale jsou i speciální případy, kdy je ocel nahrazena bronzem. Při použití vlnovce z bronzu je urychleno tuhnutí taveniny, jelikož bronz má lepší tepelnou vodivost než ocel. [16]

### 1.9.3 Simulace

Při vývoji forem se používá systém matematického modelování pohybu taveniny v dutině formy, aby se docílilo nezávadného odlitku. Jelikož se cena forem pohybuje v řádech milionů je nutná simulace. Pro potřeby simulace se tedy vytvoří model odlitku. Ten může být zasazen do stromečku o čtyřech odlitcích. Dále se vytvoří vtoková soustava, soustava ledvinek a výfuků. Pokud se jedná o technologii s vakuem tak se vytvoří i vlnovec. Výsledkem je tedy kompletní uspořádání všech těchto komponentů v jeden celek, který tvoří po spojení obou částí forem identickou dutinu. V případě společnosti ALW INDUSTRY s.r.o. je k simulacím používán

program Flow Cast. Ten je schopen nasimulovat tok kovu do formy, popřípadě do místa, kde dochází k uvěznění vzduchových bublin v dutině formy. Takto nachystaný 3D model se vloží do programu simulace a zjišťuje se, zdali nedochází například k uvězněným vzduchovým kapsám, které nedovolí kovu zatéct nebo tvoří plynové vady. Zásadní věcí při simulování je ale zaplnění kovu v komoře. Protože komora je kovem zaplněna například pouze ze 40 % svého objemu, zbytek tvoří vzduch. Aby bylo odlití úspěšné musí být vzduch vyhnán do dutiny formy jako první. Pokud tomu tak není, je vzduch v komoře uvězněn a vznikají plynové vady. Aby byl vzduch vyhnán z komory, je zapotřebí, aby píst vyvinul vlnu (obr. č. 13), která se pohybuje vpřed. Jakmile se vlna dostane na konec komory a začátek vtokové soustavy, vrací se zpět k pístu, kde vyplní celý průměr komory a postupně vytlačuje vzduch přes dutinu až do vakuové pumpy.



Obrázek 13 příklad simulace v programu Flow Cast

## 1.10 Neshody odlitku

Za neshodu se považuje odchylka od plánovaného stavu, jinými slovy se dá říct, že se jedná o vadu. Za neshodu (vadu) u odlitků se považuje jakákoliv nedokonalost odlitků oproti formě, jinými slovy, odlitek se tedy neshoduje s dutinou formy. Tyto vady se nazývají vady povrchové. Pokud se odlitek tvarově shoduje a nevykazuje na povrchu jakoukoliv neshodu s negativem formy, neznamená to vždy, že odlitek je bez vady. Vada může být uvnitř odlitku, je považována tedy za vadu vnitřní. Tyto vady, ať se jedná o vnitřní nebo povrchové, jsou vady, které se nacházejí na odlitku (nebo v něm). Existuje tu ale další skupina vad. Jedná se o vady porušení souvislosti odlitku neboli jeho narušení za vzniku trhlin nebo dokonce až jeho roztržení. [9,17]

### 1.10.1 Povrchové vady

Jak jsem zmiňoval výše jedná se o vady, které se nacházejí na povrchu odlitku. Tyto vady jsou sice nepříjemností, ale nejedná se o závažné chyby při výrobním procesu. Vady tohoto typu se dají opravit, ale oprava s sebou nese časovou náročnost. [17]

#### 1.10.1.1 Drsnost povrchu

Nejčastější vada u vysokotlakého odlévání je zvýšená drsnost povrchu, která je zapříčiněna nečistotou v dutině formy, špatným nahřátím formy na pracovní teplotu nebo nedostatkem separátoru naneseného na formu. Za nečistotu můžeme považovat například zbytky z oxidované taveniny na dutině formy z předchozího cyklu. [17;18]



Obrázek 14 příklad povrchové vady – zvýšená drsnost povrchu [18]

#### *1.10.1.2 Mapovitý povrch*

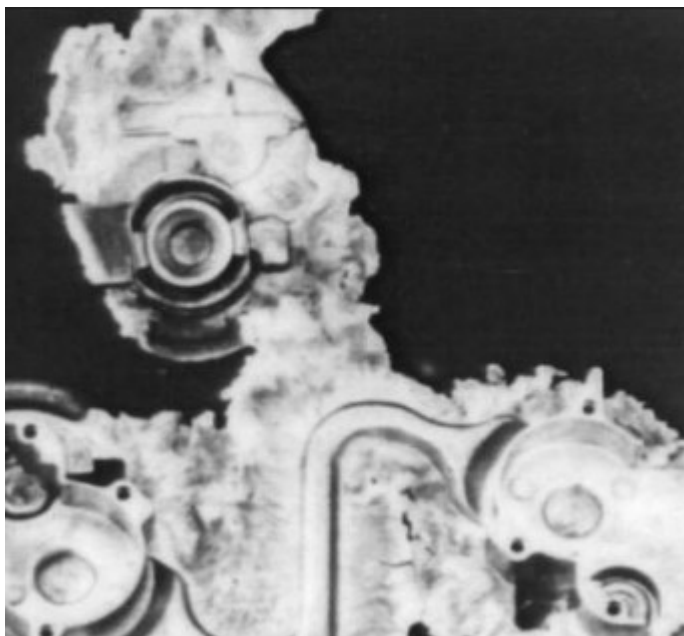
Na rozdíl od drsnosti povrchu, v případě, že nanese příliš mnoho separačního prostředku na formu, může to mít za následek vznik mapovitého povrchu odlitku. [19]



*Obrázek 15 příklad povrchové vady – mapovitý povrch [19]*

#### *1.10.1.3 Zatekliny*

Další nejčastější vadou je zateklina. Do této kategorie patří vady, vzniklé při tzv. penetraci taveniny pod vysokým tlakem do dělicí roviny formy nebo do jejich pohyblivých částí. Odlitek touto vadou není ohrožen, je pouze nutné takto vzniklý výronek kovu odstranit například odstřížením. Tato vada je častější u starších forem. [17,19]

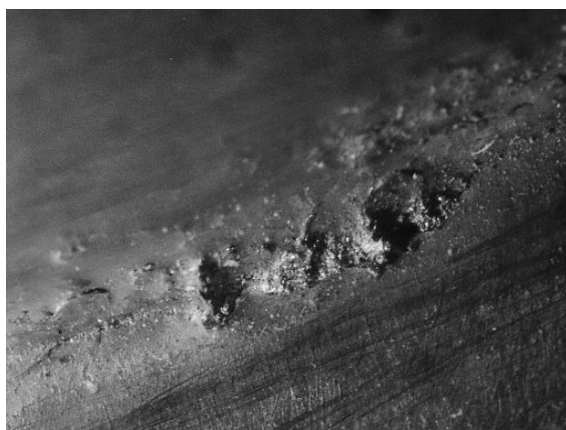


*Obrázek 16 příklad povrchové vady – zateklina [19]*



#### 1.10.1.4 Nárosty

Při nedodržení technologických postupů mohou vzniknout tzv. nárosty. Jedná se o hrbolky na povrchu odlitků, které můžeme nalézt na obrázku č. 17. Nárosty jsou způsobené v místech, kde došlo k erozi formy, tato je způsobena příliš velkou rychlostí proudění kovu a dobou plnění. [19]



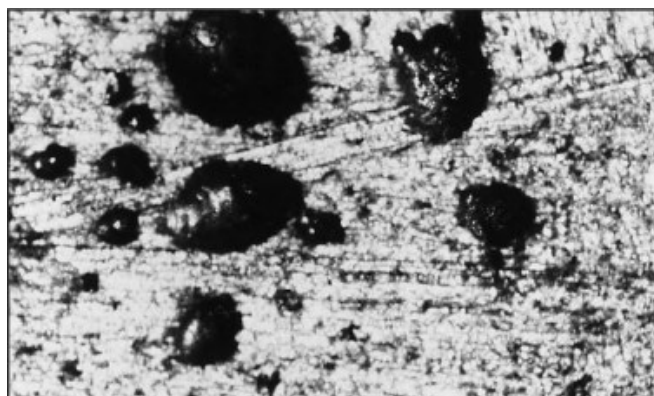
Obrázek 17 příklad povrchové vady – nárost [19]

#### 1.10.2 Vnitřní vady

Vnitřní vady jsou vady vyskytující se uvnitř objemu odlitku. Nejdůležitější kategorií těchto vad jsou dutiny. Můžeme je rozdělit na bubliny a staženiny. [17]

##### 1.10.2.1 Bubliny

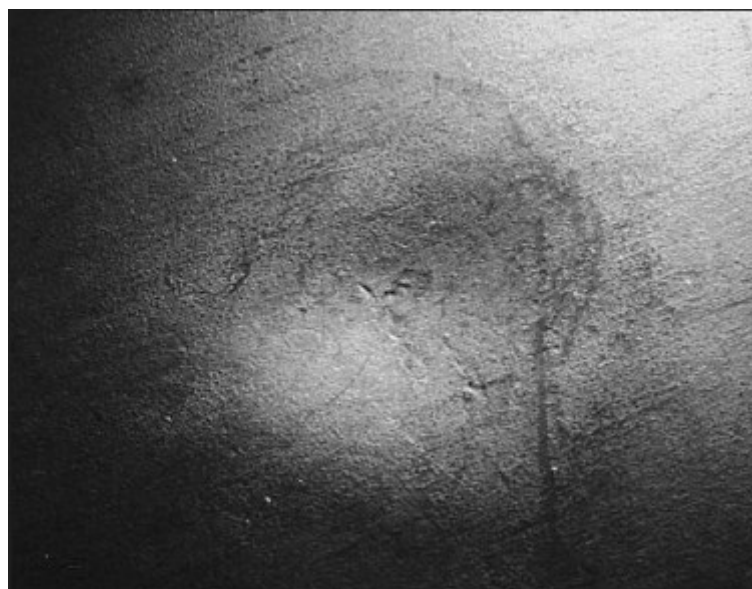
Bubliny tvoří velkou část neshod u HPDC (obr. č. 18). Jelikož se jedná o lití pod tlakem, může zde docházet k rozdělení proudů kovu ve formě, což má za následek promíšení taveniny se vzduchem. Takto promíšená tavenina reaguje se vzdušnou vlhkostí za vzniku oxidu hlinitého a vodíku. Takto vyloučený vodík se již nemá kde rozpustit, a to má za následek vznik bublin. Bubliny můžeme eliminovat žíháním jakéhokoli povrchu, kterého se tavenina dotkne, dále rafinací taveniny za pomoci rafinační soli a odplynění. Poslední možností je dokonalé odstranění vzduchu z formy za pomoci vakuových pump. [17,19]



Obrázek 18 příklad vnitřní vady – bublina [19]

#### 1.10.2.2 Staženiny

Další vnitřní vadou jsou staženiny. Ty vznikají častěji u tlustostěnných odlitků. Je to důsledek objemového smršťování při přechodu taveniny do pevné fáze. Vznikají při nevhodném průběhu tuhnutí nebo bývají zapříčiněny vysokou teplotou taveniny. Tento typ vad je kritický. Jelikož je odlitek oslaben na mechanických vlastnostech, je nutno ho při zjištění této závažné vady vyřadit. Při vzniku staženin často mohou vzniknout i praskliny za tepla, které budou popsány dále v textu. Staženiny lze poznat pouhým okem, protože vznik staženiny často doprovází vznik důlku na povrchu. [17,19]



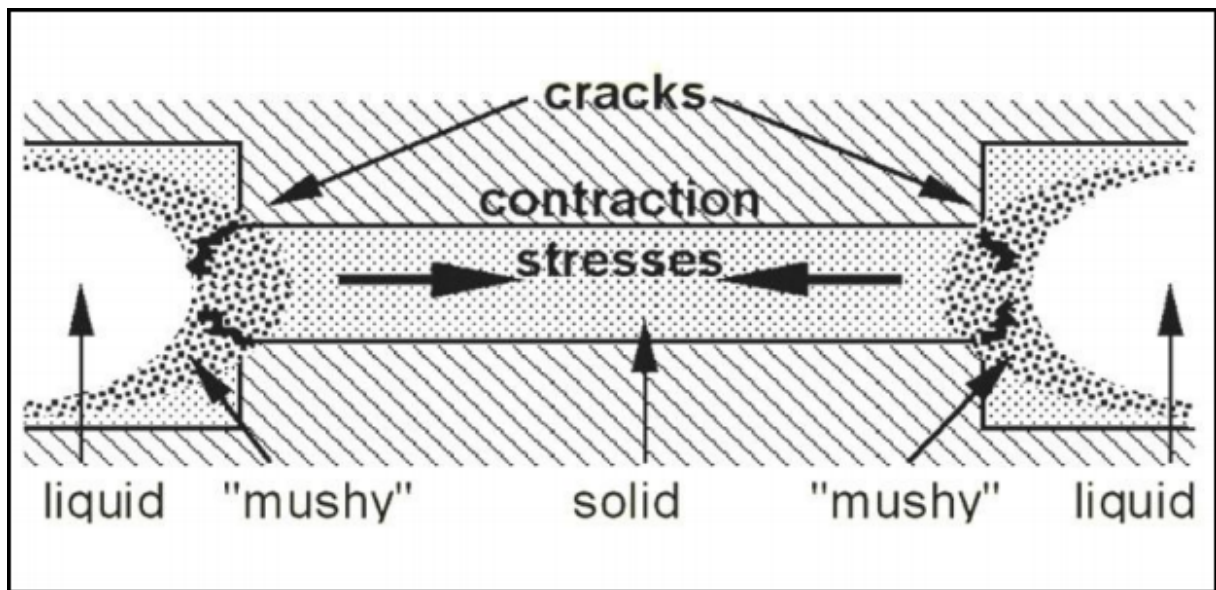
Obrázek 19 příklad vnitřní vady – staženina [19]

#### 1.10.3 Porušení souvislosti odlitku

U porušení souvislosti na odlitku dochází jinými slovy k trhlinám nebo prasklinám. Další z možností těchto vad mohou být například studené spoje. Tato vada vzniká v důsledku nespojení kovu, zatím co vady jako trhliny a praskliny vznikají z důvodu mechanického porušení. [17]

##### 1.10.3.1 Trhliny

Trhliny mohou být vnitřní nebo povrchové a dochází k nim v době chladnutí odlitku. Trhliny se vyskytují u odlitků s různými tloušťkami stěn. Vznikají taky jako doprovodný jev u staženin, které jsou popsány výše. Trhliny za tepla vznikají, jak je patrné z obrázku č. 20, v důsledku tahového napětí již ztuhlé taveniny v oblasti odlitku, kde se teplota pohybuje mezi oblastí likvidu a solidu, takové oblasti říkáme oblast dvoufázová (mushy). V této oblasti odlitek tuhne a získává plasticitu a pevnost, avšak tahové napětí z již ztuhlé části odlitku (tenčí stěna) způsobí natržení materiálu v této oblasti. [10,19]



Obrázek 20 schéma vzniku trhlin za tepla [10]

#### 1.10.3.2 Praskliny

Praskliny na rozdíl od trhlin jsou způsobené mechanickým namáháním například u otevírání formy nebo vyjmutí odlitku. Prasklina nejčastěji vzniká, když odlitek není dostatečně zchlazen. Nedostatečné zchlazení má za vinu nedostatečný nárůst pevnosti. Další možností prasklin jsou příliš ostré hrany formy. [17]

#### 1.10.3.3 Studené spoje

Studené spoje mohou vzniknout, pokud je forma nerovnoměrně nahřátá. Pokud jsou na formě místa, která jsou chladnější tak při vstupu taveniny do dutiny formy může tavenina zchladnout rychleji než zbytek. Tím se vytvoří dvě necelistvé části odlitku. [17]

## 2 Praktická část

Cílem praktické části této práce je analýza dat měření odlevu kovu z naběraček, které přenáší taveninu do vstřelovací komory. Výsledkem této analýzy bude závislost surové váhy odlitku na době odlevu.

### 2.1 Aktuální výroba

Měření probíhalo ve spolupráci s firmou ALW INDUSTRY s.r.o., která se specializuje na odlitky vyráběné technologií vysokotlakého lití. Firma má k dispozici stroje pro vysokotlaké lití se studenou horizontální komorou a podporou vakua. Pro přenos kovu se používají naběračky, firma disponuje se dvěma typy, a to s naběračkami z keramiky a z litiny. U některých strojů se v důsledku jejich nadměrných velikostí musí použít i koryta. Koryto slouží jako mezičlánek pro přenos taveniny mezi naběračkou a komorou. Pro odlitky se zde nejčastěji používá materiál EN AC-44300, EN AC-47100 a EN AC-46000, jehož chemické složení je popsáno v kapitole 1.2 Značení hliníku.

### 2.2 Průběh měření

Měřenou veličinou byl čas potřebný pro přemístění kovu z naběračky do komory.

K měření času odlevu jsem použil stopky. Jako signál k započetí měření byla použita kontrolka ovládacího panelu TLS, která informuje o uzavření formy maximálním tlakem, a stroj dostává signál, že může být kov bezpečně nalit do komory. K ukončení měření sloužil první pohyb pístu. Dále jsem si při každém měření zapsal váhu odlevu, typ použité naběračky a průměr komory.

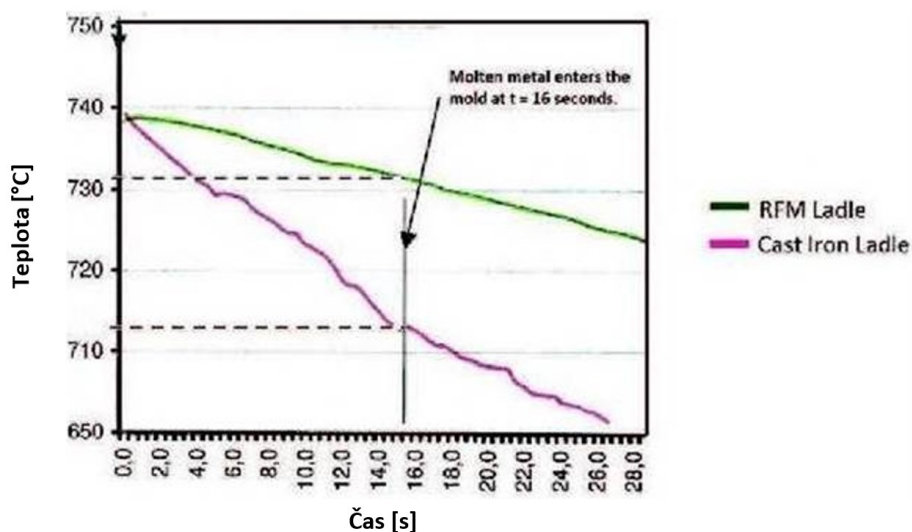
Surová váha odlitku a průměr komory jsou veličiny, které jsou přímo závislé jak na čase, tak jedna na druhé. Typ použité naběračky je sice zanedbatelný, ale hraje zde taky důležitou roli, jak se přesvědčíme dále v textu.

### 2.3 Naběračky a jejich vliv

Naběračka kovu slouží k přenosu taveniny z udržovací pece do komory. Jedná se o velmi tepelně namáhanou součást celé technologie. Zde teda budu rozebírat naběračky pro vysokotlaké lití se studenou horizontální komorou.

Firma ALW INDUTRY s.r.o. tedy disponuje dvěma typy naběraček. Jedná se o naběračky z litiny a z kompozitu keramiky a skelných vláken (RFM). Keramika na rozdíl od litiny výborně

funguje jako izolant. To znamená, že teplo z taveniny není umožněn přestup na rozhraní, tavenina a stěna naběračky, v tak vysoké míře, než u naběraček litinových. Díky této vlastnosti se může snížit teplota v udržovací peci o cca 20 °C, jak lze vidět na obrázku č. 21.



Obrázek 21 graf poklesu teploty taveniny v závislosti na čase u naběraček s kapacitou 8 kg [20]

Další vliv naběraček na technologii je rychlost odlevu. I když je u litinové naběračky možnost kontaminace taveniny železem, při její erozi, nebo je tavenina rychleji ochlazována, domnívám se, že je používána pro její rychlost odlevu, která je znatelná v tabulce č. 6.

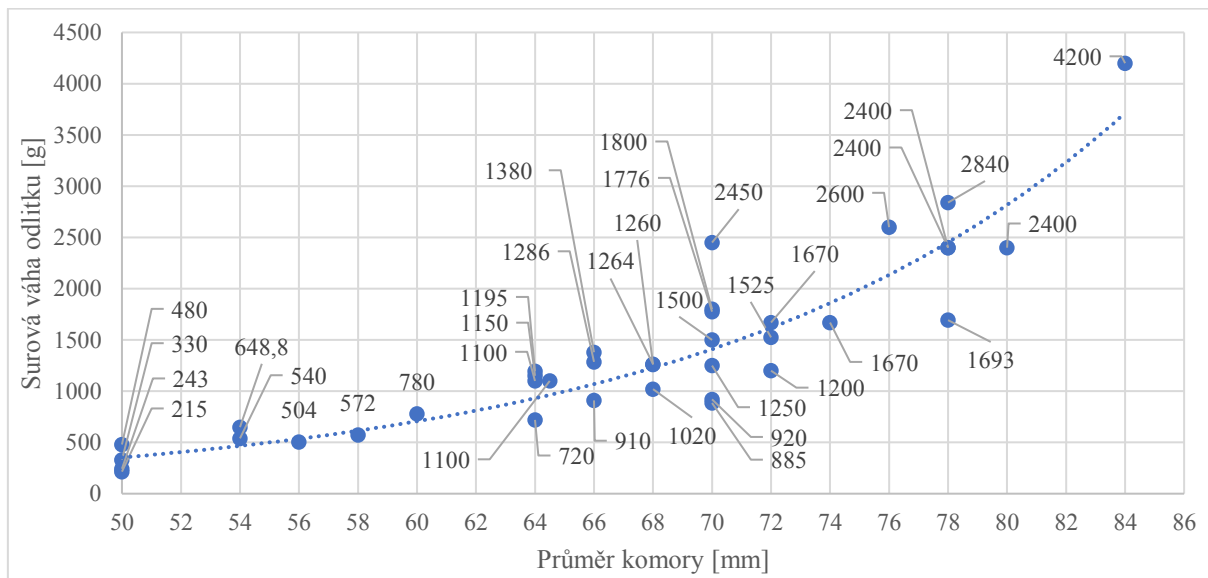
Tabulka 6 rozdíl času odlevu u rozdílných naběraček při stejném nastavení stroje

Typ stroje	Material	Surová váha odlitku [g]	Teplota [°C]	Průměr komory [mm]	Typ naběračky	Měření č. 1 [s]	Měření č. 2 [s]	Měření č. 3 [s]	Měření č. 4 [s]	Měření č. 5 [s]
Bühler	EN AC-47100	2400	700	78	keramika	6,4	6,55	6,41	6,55	6,61
Bühler	EN AC-47100	2400	700	78	litina	6,27	6,26	6,21	6,27	6,25

V tabulce č. 6 můžeme vidět, že při stejném nastavení stroje se čas odlevu liší o průměrně 0,25 sekundy. To by mohlo být způsobeno zvýšenou drsností povrchu u keramických naběraček.

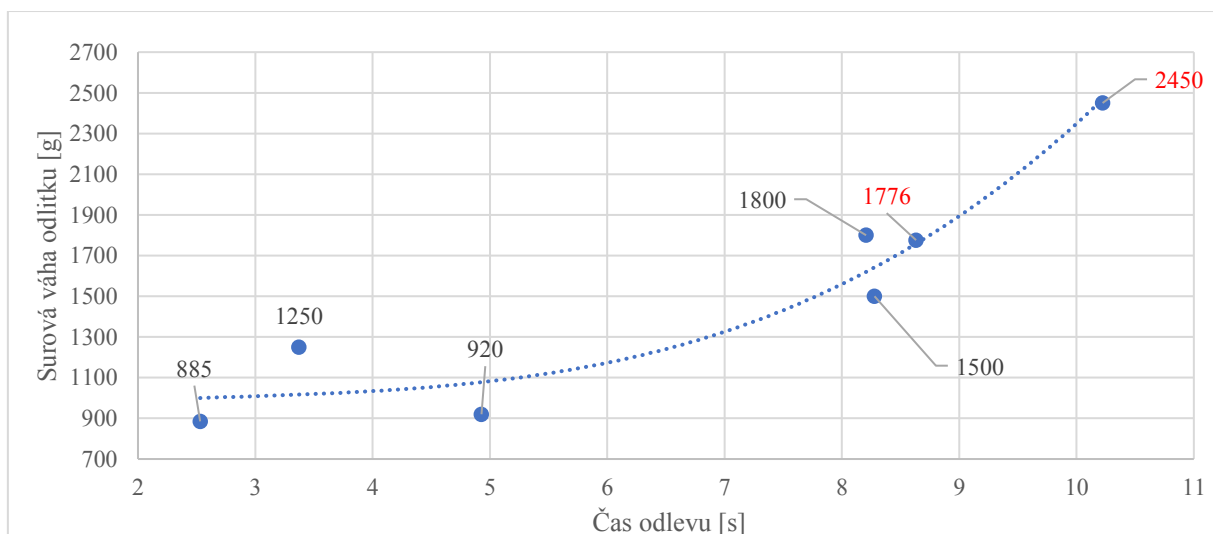
## 2.4 Výsledky měření

Sledované veličiny byly tedy hlavně čas odlevu, surová váha odlitku a průměr komory. Tyto hodnoty jsou závislé tedy jedna na druhé. Při větší hmotnosti taveniny tedy roste průměr komory i čas odlevu. Tyto závislosti dokazují obrázky č. 22 a 23.



Obrázek 22 graf závislosti surové váhy odlitku na průměru komory

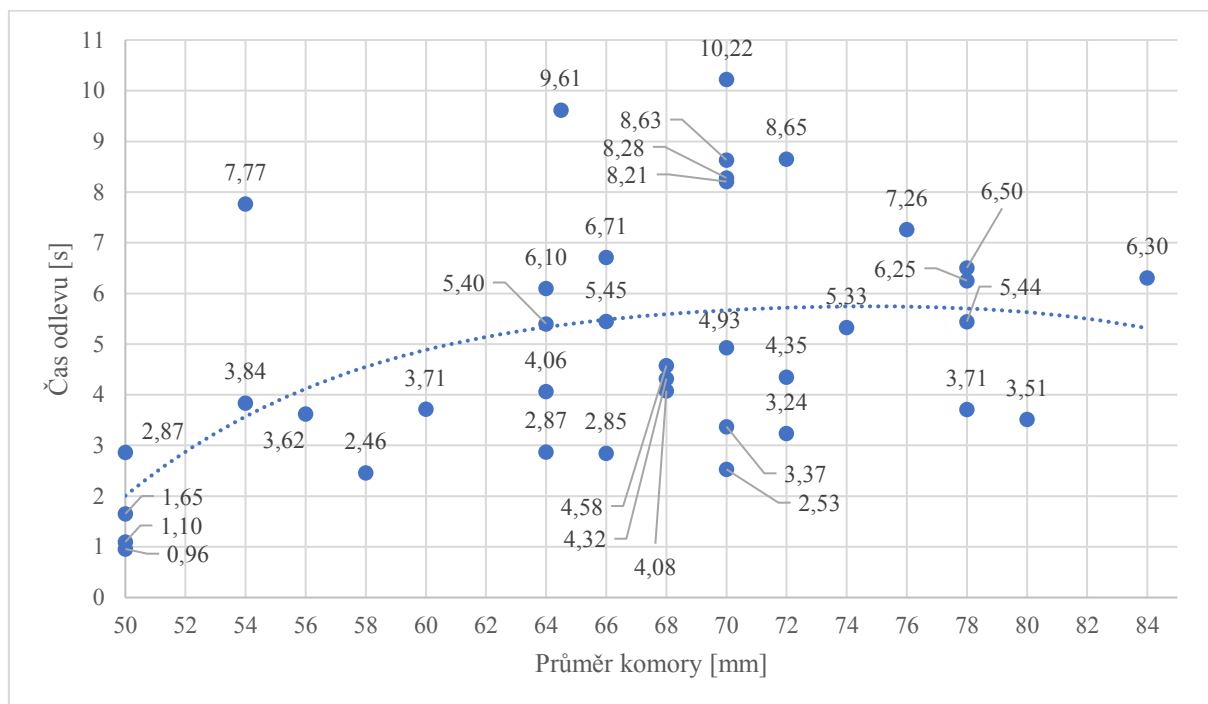
Jak můžeme vidět na obrázku č. 22, při vyšší surové hmotnosti odlitku, bude větší i průměr komory. Komory bývají zpravidla plněné pouze do 40 % svého objemu, z toho plyne, že při větší surové váze musí být v poměru zvolena nová komora odpovídajícího rozměru, aby se nějak výrazně nepřekročila míra zaplnění. Měření v praxi ukázalo, že pro hmotnost 215 g surové váhy odlitku byla použita komora s vnitřním průměrem 50 mm. Na druhé straně grafu je možno nalézt surovou váhu 4200 g, pro kterou byla použita komora s průměrem 84 mm.



Obrázek 23 graf závislosti surové váhy odlitku na době odlevu

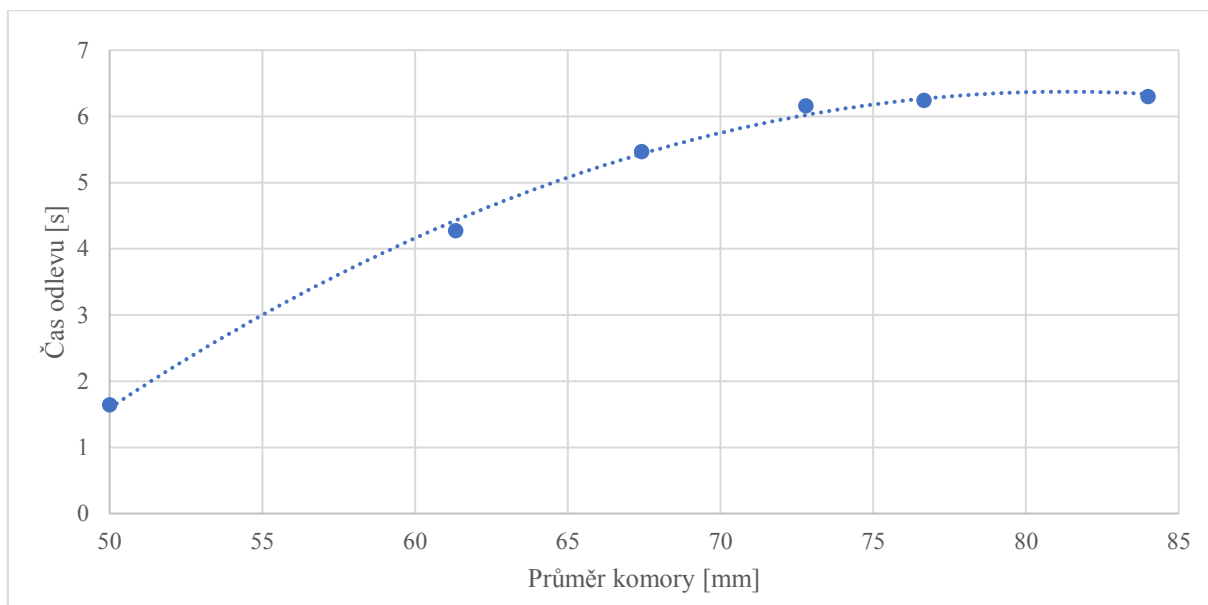
Z obrázku č. 23 je patrné, že se zvětšující se surovou hmotností odlitku, roste čas odlevu taveniny do komory. Červené hodnoty označují odlitky, u kterých bylo použito koryto. Například u váhy odlitku 1776 g je oproti 1800 g nárůst času odlevu o 5,2 %. Tyto hodnoty znázorňují pouze část dat, jelikož jsem musel odstranit další proměnnou, a to je průměr komory. Jak lze vyčíst z obrázku č. 22 jedná se o hodnoty, které mají společnou velikost průměru komory.

Poslední závislost ukazuje spojení mezi průměrem komory a časem odlevu.



Obrázek 24 graf závislosti času odlevu a průměrem komory

Ze závislosti na obrázku č. 24 vyplývá, že se zvětšující se komorou se zvyšuje doba nálevu. Avšak od průměru komory 72 mm se doba odlevu zkracuje. Přestože se udává zaplnění komory kolem 40 % objemu, v praxi tomu tak vždy není. Mohou se například použít větší komory z důvodu nedostatečného množství náhradních komor. Čím je větší komora, tím se může zvětšovat i otvor pro vstup taveniny. Pro komoru o vnitřním průměru 50 mm byl zaměřen otvor 82x80 mm (ŠxV), a pro komoru o vnitřním průměru 80 mm bylo naměřeno 108x100 mm. Rozdíl těchto ploch je 4240 mm<sup>2</sup>. S větším otvorem si můžeme dovolit větší rychlost odlevu. Komory stejných průměrů avšak nemusí mít stejné otvory, bude záviset, zda se jedná o komoru novou nebo repasovanou. Repasované jsou původně opotřeбенé, jejich přefrézováním vznikají komory větších průměrů, tyto lze dále uplatnit při výrobě. Tento fakt, společně se surovou hmotností odlitku se v obrázku č. 24 nezohledňuje. Pro eliminaci surové hmotnosti jsem si naměřená data rozdělil na 6 kategorií, právě podle váhy, po 500 g.



Obrázek 25 graf závislosti času odlevu na průměru komory (počítáno s hmotností odlevu)

Obrázek č. 25 počítá i se surovou váhou odlevu. Kategorie jsou tedy rozděleny po 500 g, a to od 0 až po 4200 g (hodnoty pro rozmezí 1801 – 2399 g nebyly naměřeny). Hmotnostní rozpětí jsou uvedena v tabulce č. 7, a to souběžně s obrázkem č. 25 zleva doprava.

Tabulka 7 Hmotnostní rozpětí kategorií

Kategorie č.	1	2	3	4	5	6
Hmotnostní rozpětí [g]	215-480	504-920	1020-1525	1670-1800	2400-1800	4200

U takto rozdělených kategorií byla použita průměrná hodnota času odlevu a velikost průměru plnicí komory. Výsledkem je tedy grafická závislost, která je uvedena na obrázku č. 25. Zde je patrné, že s rostoucím průměrem komory se zvyšuje čas odlevu. Rovněž lze konstatovat, že s rostoucím průměrem se výrazně snižují rozdíly v časech odlevu.



### 3 Závěr

Práce byla zaměřena na možnosti optimalizace vysokotlakého lití. V rámci řešení bakalářské práce se hlavní pozornost věnovala stanovení podmínek odlevu kovu z naběračky do plnicí komory stroje. Měření experimentální části proběhlo ve spolupráci s firmou ALW INDUSTRY s.r.o. v reálných provozních podmínkách.

V teoretické části je blíže popsána technologie vysokotlakého lití s jejím rozdělením podle typu vstupního materiálu. Dále pak popis odlevu taveniny do dutiny formy, který je také označován jako „vstřel“. Další část je pak věnována popisu formy a nejčastějším typům neshod u této technologie.

V experimentální části pracuji s daty, která jsem získal v reálném provozu. Na základě těchto výsledků byly získány vzájemné závislosti mezi surovou hmotností odlitku, časem odlevu a průměrem plnicí komory. Tyto stanovené veličiny vykazují vyšší míru vzájemné závislosti. S rostoucí hmotností taveniny roste doba odlevu a adekvátně je tak nutno přizpůsobit i průměr komory, aby se dodržela podmínka míry jejího zaplnění kolem 40 % objemu.

Práce v reálných podmínkách ukázala, že je nutno pracovat a zabývat se řadou parametrů, které jsou velmi proměnné a lze předpokládat jejich vliv na sledovanou problematiku. Pro jejich ověření bude nutno výrazně rozšířit rozsah provedených experimentů, ve kterých budou zohledněny i další veličiny. Této oblasti bych se chtěl nadále věnovat i v řešení mé diplomové práce.

## Použitá literatura

- [1] FLAGEL, Jordan. Top 10 Uses of Aluminium in the Industry Today. Matmatch [online]. Německo: Matmatch, 2020 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://matmatch.com/blog/top-10-uses-of-aluminium-in-the-industry-today/>
- [2] PODRÁBSKÝ, Tomáš, Martin JULIŠ a Karel NĚMEC. Neželezné kovy a jejich slitiny. In: Slide Share [online]. b.r. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2894537/>
- [3] KOŘENÝ, Rudolf. Slévárenství neželezných kovů a slitin. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1971.
- [4] ČSN EN 1706 (421433). NORMY biz [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/511430>
- [5] LICHÝ, Petr. Slitiny hliníku. Presentation presented at: [Microsoft Teams; 7.května 2020; Ostrava; Česká republika.]
- [6] MakeItFrom.com: Euronorm (EN) Cast Aluminum [online]. 2020 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Euronorm-EN-Cast-Aluminum>
- [7] Metalurgie slitin Al. Fakulta strojní ČVUT v Praze [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT v Praze [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/129/Slitiny-Al.pdf>
- [8] Aluminum Hypoeutectic Alloys. Total Materia [online]. Switzerland: Total Materia, 2007 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=KTN&NM=454>
- [9] JELÍNEK, Petr. Slévárenství. 5. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1282-3.
- [10] KAUFMANN, Helmut a Peter J. UGGOWITZER. Metallurgy and processing of high integrity light metal pressure castings. 754. Berlin: Schiele & Schön, 2007. ISBN 978-3-7949-0754-0.
- [11] A&B Die Casting - THE PROCESS. A&B Die Casting [online]. Hercules (USA): A&B Die Casting, 2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.abdiecasting.com/technical-data/the-process/>
- [12] Squeeze Casting Process: Part One. Total Materia [online]. Switzerland: Total Materia, 2007 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=172>

- [13] ABDULRAZAQ, Assoc. Prof. Dr. Mohammed, M.Z. OMAR, Assoc. Prof. Ir. Ts. Dr. Mohd SALLEH, Khaled ALHAWARI a Mnel A H ABDELGNEI. An Overview of Semi-Solid Metal Processing. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2014/01/01, 8, 369-373.
- [14] Konstrukce formy pro tlakové lití. Ústav strojírenské technologie ČVUT [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, b.r. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/konstrukce-forem.pdf>
- [15] HYNEK, Martin, Miroslav GRACH a Jiří BENDA. Tlakové lití hliníku [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-verfin/OPVK\\_PU/KA\\_01\\_publicace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-verfin/OPVK_PU/KA_01_publicace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf)
- [16] Katalog vad odlitků ze slitin hliníku. [Brno]: Česká slévárenská společnost, 2018. ISBN 978-80-02-02817-8.
- [17] CURLE, U. A., J. D. WILKINS a G. GOVENDER. Industrial Semi-Solid Rheocasting of Aluminum A356 Brake Calipers. Advances in Materials Science and Engineering [online]. 2011, 2011, 1-5 [cit. 2021-04-06]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2011/195406
- [18] RAHIMI, Arman. Introduction Of High Pressure Die-Casting And Common Defects In Die-Casting. Iran-mavad [online]. Irán: iran-mavad [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <http://dl.iran-mavad.com/sell/trans/en/Introduction%20Of%20High%20Pressure%20Die-Casting.pdf>
- [19] AAM - applications. European aluminium [online]. Belgie, 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.european-aluminium.eu/media/1544/aam-products-6-cast-alloys-and-products.pdf>
- [20] KOLÁŘ, Petr. Bc. práce – Informace [elektronická pošta]. Message to: [danielnepustil@hotmail.cz](mailto:danielnepustil@hotmail.cz). 13. 4. 2021 17:10 [cit. 2021-04-28]. Osobní komunikace.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Binární diagram Al-Si [5] .....	9
Obrázek 2 příklad odlitku vysokotlakého lití – převodová skříň [10].....	11
Obrázek 3 schéma HPDC se studenou horizontální licí komorou [12].....	13
Obrázek 4 schéma HPDC s vertikální teplou komorou [12] .....	14
Obrázek 5 schéma Squeeze casting přímá metoda [13] .....	15
Obrázek 6 schéma fází u technologie Rheocasting [14] .....	16
Obrázek 7 schéma dvoušroubového Rheo-moulding stroje [14] .....	16
Obrázek 8 schéma různých možností pro Thixocasting [14] .....	16
Obrázek 9 schéma procesu Thixomoulding [14] .....	17
Obrázek 10 graf rychlosti pístu v závislosti na pohybu pístu.....	18
Obrázek 11 3D model pevné částí formy u HPDC [16].....	20
Obrázek 12 vlnovec pro formy podporované vakuem .....	21
Obrázek 13 příklad simulace v programu Flow Cast .....	22
Obrázek 14 příklad povrchové vady – zvýšená drsnost povrchu [18] .....	23
Obrázek 15 příklad povrchové vady – mapovitý povrch [19].....	24
Obrázek 16 příklad povrchové vady – zateklina [19] .....	24
Obrázek 17 příklad povrchové vady – nárost [19] .....	25
Obrázek 18 příklad vnitřní vady – bublina [19] .....	25
Obrázek 19 příklad vnitřní vady – staženina [19] .....	26
Obrázek 20 schéma vzniku trhlin za tepla [10].....	27
Obrázek 21 graf poklesu teploty taveniny v závislosti na čase u naběraček s kapacitou 8 kg [20] .....	29
Obrázek 22 graf závislosti surové váhy odlitku na průměru komory .....	30
Obrázek 23 graf závislosti surové váhy odlitku na době odlevu.....	30
Obrázek 24 graf závislosti času odlevu a průměrem komory .....	31
Obrázek 25 graf závislosti času odlevu na průměru komory (počítáno s hmotností odlevu) .....	32

## Seznam tabulek

Tabulka 1 chemické složení AlSi12(Fe) [6].....	8
Tabulka 2 chemické složení AlSi12Cu [6].....	8
Tabulka 3 chemické složení AlSi9Cu3(Fe) [6].....	8
Tabulka 4 srovnání pracovních cyklu u HPDC se studenou a teplou komorou [11] .....	17
Tabulka 5 doporučené hodnoty tlaku u různých slitin [15].....	19
Tabulka 6 rozdíl času odlevu u rozdílných naběraček při stejném nastavení stroje.....	29
Tabulka 7 Hmotnostní rozpětí kategorií.....	32